



Optimizing Water Pressure Control using Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller via Variable Frequency Drive (VFD)

Vadsana Puykhammee ¹, Keokanlaya Sihalath ², Donekeo Lakanchanh ³, Phutsavanh Thongphanh ⁴, Soumek Inthala ⁵ and Khamsavad Vongpaxa ⁶

¹⁻⁴Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, National University of Laos.

⁵Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, National University of Laos.

⁶Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Champasak University.

¹**Correspondence:** Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, National University of Laos, Email: vsnpkm1988@gmail.com

Abstract

The challenges of water pressure fluctuations and significant electrical energy loss in pumping systems, driven by dynamic and irregular consumer usage behaviors, present critical issues for water supply management in high-rise buildings. This research aims to investigate and optimize closed-loop water pressure control using a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller integrated with a Variable Frequency Drive (VFD) to maintain stable water pressure under highly fluctuating demand conditions. The methodology involves developing a mathematical model based on pump Affinity Laws and simulating the system using MATLAB/Simulink. The system was evaluated by establishing a target pressure set-point of 30.6 meters and introducing flow rate disturbances ranging from 20 to 60 liters per second (L/s). The simulation results demonstrate that the tuned PID controller with parameters $K_p = 15$, $K_i = 20$, and $K_d = 0.01$ responds rapidly to system variations, achieving a settling time of less than 1.5 seconds and successfully eliminating steady-state error ($e_{ss} \approx 0$) with statistical significance ($p \leq 0.001$). Furthermore, the implementation of the VFD allows for motor frequency reduction during low-demand periods, thereby enhancing energy savings and mitigating the adverse effects of water hammer within the pipeline network. These findings confirm that the developed system possesses high stability and can be effectively utilized as a benchmark for designing smart water supply systems in practical engineering applications.

Article Info:
Submitted: April 23, 2026
Revised: June 01, 2026
Accepted: June 24, 2026

Keywords: Water Pressure Control, PID Controller, Variable Frequency Drive (VFD), MATLAB/Simulink, Energy Saving.

1. ພາກສະໜີ

ໃນຍຸກປະຈຸບັນ, ການຊົມໃຊ້ພະລັງງານໄຟຟ້າໃນອາຄານສູງ ແລະ ຂະແໜງການອຸດສາຫະກຳມີທ່າອ່ຽງເພີ່ມຂຶ້ນຢ່າງຕໍ່ເນື່ອງ, ເຊິ່ງລະບົບປ້ຳນ້ຳຖືເປັນສ່ວນປະກອບຫຼັກທີ່ຊົມໃຊ້ພະລັງງານໄຟຟ້າໃນປະລິມານມະຫາສານ. ບັນຫາທີ່ພົ້ນເດັ່ນໃນການບໍລິຫານຈັດການລະບົບນ້ຳປະປາຄື ພິດຕິກຳການຊົມໃຊ້ນ້ຳຂອງຜູ້ຊົມໃຊ້ທີ່ມີຄວາມຜັນຜວນ

ຕະຫຼອດເວລາ, ເຊິ່ງສົ່ງຜົນໃຫ້ແຮງດັນນ້ຳໃນເສັ້ນທໍ່ບໍ່ຄົງທີ່. ຫາກແຮງດັນນ້ຳສູງເກີນໄປຈະເຮັດໃຫ້ເກີດຄວາມເສຍຫາຍຕໍ່ອຸປະກອນ ແລະ ທໍ່ສົ່ງນ້ຳ, ແຕ່ຫາກແຮງດັນຕໍ່າເກີນໄປກໍຈະບໍ່ສາມາດຕອບສະໜອງຄວາມຕ້ອງການໃນຈຸດຊົມໃຊ້ທີ່ຢູ່ອາຄານຊັ້ນເທິງໄດ້ (Volk, 2013). ເພື່ອຍົກລະດັບການບໍລິຫານຈັດການໃຫ້ມີຄວາມທັນສະໄໝ ແລະ ປອດໄພ, Southisombath et al. (2025) ໄດ້ເນັ້ນໃຫ້ເຫັນ

ເຖິງຄວາມສໍາຄັນຂອງການນໍາໃຊ້ລະບົບຄວບຄຸມຕັກກະທີ່ສາມາດໂປຣແກຣມໄດ້ (Programmable Logic Controller: PLC) ແລະ ລະບົບປະສານງານລະຫວ່າງມະນຸດກັບເຄື່ອງຈັກ (Human Machine Interface: HMI) ເຂົ້າໃນການຄວບຄຸມ ແລະ ຕິດຕາມຜົນແບບລວມສູນ ເຊິ່ງຊ່ວຍໃຫ້ການບໍລິຫານຈັດການລະບົບນໍ້າໃນລະດັບອຸດສາຫະກຳມີຄວາມແມ້ນຢ່າງສູງຂຶ້ນ.

ການຄວບຄຸມແຮງດັນແບບດັ້ງເດີມທີ່ນໍາໃຊ້ວາວແມ່ນວິທີການທີ່ສູນເສຍພະລັງງານຫຼາຍ ເພາະມີເຕີຍັງຄົງເຮັດວຽກທີ່ຄວາມໄວຮອບສູງສຸດຕະຫຼອດເວລາ. ເພື່ອແກ້ໄຂບັນຫາດັ່ງກ່າວ, ການນໍາໃຊ້ລະບົບຂັບເຄື່ອນຄວາມຖີ່ສະຫຼັບ (Variable Frequency Drive: VFD) ຈຶ່ງກາຍເປັນທາງເລືອກທີ່ສໍາຄັນເພາະສາມາດປັບຄວາມໄວຮອບຂອງມໍເຕີໃຫ້ສອດຄ່ອງກັບຄວາມຕ້ອງການຈິງ. ອີງຕາມທິດສະດີໄຮໂດຣລິກຂອງກົດເກນຄວາມຄ້າຍຄືກັນຂອງປໍ້າ (Affinity Laws), ການຫຼຸດຄວາມໄວຮອບຂອງປໍ້າລົງພຽງເລັກນ້ອຍສາມາດຫຼຸດຜ່ອນການຊົມໃຊ້ພະລັງງານໄດ້ຢ່າງຫຼວງຫຼາຍ ເນື່ອງຈາກກຳລັງໄຟຟ້າຈະແປຜັນຕາມກຳລັງສາມຂອງຄວາມໄວຮອບ ($P \propto n^3$) (Grundfos, 2018; United States Department of Energy, 2016).

ຈາກການທົບທວນເອກະສານ ແລະ ງານວິໄຈທີ່ກ່ຽວຂ້ອງ Ogata (2010), Kuo (2014) ແລະ Åström & Hägglund (2006) ໄດ້ລະບຸວ່າ ຕົວຄວບຄຸມແບບ Proportional-Integral-Derivative (PID) ແມ່ນກົນໄກການຄວບຄຸມແບບປິດທີ່ມີປະສິດທິພາບສູງສຸດໃນການຮັກສາສະເຫຼຍລະພາບຂອງລະບົບ. ນອກຈາກນີ້, Grelewicz et al. (2021) ໄດ້ຊີ້ໃຫ້ເຫັນວ່າການປະເມີນສະມັດຖະພາບຂອງລະບົບຄວບຄຸມທີ່ອີງໃສ່ PID ສາມາດພັດທະນາໃຫ້ດີຂຶ້ນໄດ້ໂດຍການປະຍຸກໃຊ້ເຕັກນິກການຮຽນຮູ້ຂອງເຄື່ອງຈັກ, ໃນຂະນະທີ່ Kazeminasab et al. (2020) ໄດ້ນໍາສະເໜີຄວາມຍືດຫຍຸ້ນຂອງຕົວຄວບຄຸມ PID ໃນການຈັດການກັບລະບົບທີ່ມີຄວາມຊັບຊ້ອນ ແລະ ຜັນຜວນ. ຄຽງຄູ່ກັນນັ້ນ, ການຄົ້ນຄວ້າຂອງ Bose (2006) ຍັງເນັ້ນໃຫ້ເຫັນວ່າ ການປະສົມປະສານລະຫວ່າງ VFD ແລະ PID ບໍ່ພຽງແຕ່ຊ່ວຍໃນການຮັກສາແຮງດັນໃຫ້ຄົງທີ່, ແຕ່ຍັງຊ່ວຍຫຼຸດຜ່ອນຜົນກະທົບຈາກປະກົດການແຮງດັນກະແທກໃນເສັ້ນທໍ່ (Water Hammer) ເຊິ່ງຊ່ວຍຍຶດອາຍຸການໃຊ້ງານຂອງລະບົບທີ່ສິ່ງນໍ້າ. ເຖິງຢ່າງໃດກໍຕາມ, ການປັບຈຸນຄ່າພາຣາມີເຕີຂອງ PID ໃຫ້ເໝາະສົມ

ກັບລັກສະນະສະເພາະຂອງແຕ່ລະລະບົບຍັງເປັນສິ່ງທ້າທາຍທີ່ຕ້ອງໄດ້ຮັບການສຶກສາຢ່າງລະອຽດ.

ສະນັ້ນ, ການຄົ້ນຄວ້າໃນຄັ້ງນີ້ຈຶ່ງມີຈຸດປະສົງເພື່ອອອກແບບ ແລະ ຈຳລອງລະບົບຄວບຄຸມແຮງດັນນໍ້າອັດຕະໂນມັດ ໂດຍນໍາໃຊ້ຕົວຄວບຄຸມ PID ຮ່ວມກັບ VFD ຜ່ານໂປຣແກຣມ MATLAB/Simulink ເພື່ອວິເຄາະຄວາມສາມາດໃນການຮັກສາແຮງດັນນໍ້າປາຍທາງໃຫ້ຄົງທີ່ຢູ່ທີ່ 30.6 ແມັດ ພາຍໃຕ້ສະພາວະການຊົມໃຊ້ນໍ້າທີ່ຜັນຜວນ.

2. ອຸປະກອນ ແລະ ວິທີການ

2.1 ອຸປະກອນ ແລະ ເຄື່ອງມືທີ່ນໍາໃຊ້

ການສຶກສາໃນຄັ້ງນີ້ໄດ້ນໍາໃຊ້ລະບົບຄອມພິວເຕີໃນການປະມວນຜົນແບບຈຳລອງ ໂດຍມີລາຍລະອຽດເຄື່ອງມືດັ່ງນີ້:

- ໂປຣແກຣມ MATLAB/Simulink (Version 2018a): ນໍາໃຊ້ເປັນເຄື່ອງມືຫຼັກໃນການສ້າງບລັອກໄດອະແກຣມ ແລະ ວິເຄາະສັນຍານ. ໂປຣແກຣມນີ້ໄດ້ຮັບການຍອມຮັບໃນລະດັບສາກົນວ່າເປັນມາດຕະຖານສໍາລັບການອອກແບບລະບົບຄວບຄຸມອັດຕະໂນມັດ (MathWorks, 2018).

- PID Controller Block: ນໍາໃຊ້ບລັອກມາດຕະຖານຈາກ Simulink Library ທີ່ຮອງຮັບການຕັ້ງຄ່າແບບ Parallel Form ເພື່ອຄວາມງ່າຍໃນການປັບຈຸນຄ່າພາຣາມີເຕີ (Xue et al., 2007).

- VFD Model: ຈຳລອງຜ່ານລະບົບການປ່ຽນແປງຄວາມຖີ່ທີ່ກຳນົດຂອບເຂດ ຢູ່ທີ່ 30 ຫາ 50 Hz ເພື່ອໃຫ້ສອດຄ່ອງກັບມາດຕະຖານການເຮັດວຽກຂອງມໍເຕີໄຟຟ້າກະແສສະຫຼັບ (Rashid, 2017).

2.2 ການສ້າງແບບຈຳລອງທາງຄະນິດສາດ

ກ່ອນການຈຳລອງ, ໄດ້ມີການວິເຄາະຫາຈຸດເຮັດວຽກ ເພື່ອຫາຄ່າສໍາປະສິດຄວາມສຽດທານ (Coefficient of Friction: c) ທີ່ເໝາະສົມກັບລະບົບ ດັ່ງສະແດງໃນຮູບພາບທີ 1. ເພື່ອໃຫ້ແບບຈຳລອງສະແດງຜົນໄດ້ຢ່າງຖືກຕ້ອງ, ໄດ້ມີການກຳນົດສົມຜົນຜືນຖານດັ່ງນີ້:

- ສົມຜົນປໍ້າ ແລະ ລະບົບທໍ່: ແຮງດັນຕົວຈິງ (H_{actual}) ແມ່ນຜົນລວມຂອງແຮງດັນທີ່ປໍ້າຜະລິດໄດ້ ລົບກັບຄວາມສູນເສຍໃນເສັ້ນທໍ່. ໂດຍອ້າງອີງຕາມຫຼັກການຂອງ Darcy-Weisbach, ຄວາມສູນເສຍຈະແປຜັນຕາມກຳລັງສອງຂອງອັດຕາການໄຫຼ (Q) ແລະ ແຮງດັນທີ່ປໍ້າ

ຜະລິດໄດ້ (H_{pump}) ຈະແປຜັນຕາມກຳລັງສອງຂອງຄວາມຖີ່ (f) ດັ່ງສົມຜົນ (Grundfos, 2018)

$$H_{actual} = H_{pump} - c \cdot Q^2 \quad (1)$$

$$H_{pump} = H_0 \cdot \left(\frac{f}{f_{nominal}} \right)^2 \quad (2)$$

ໂດຍທີ່

- H_{actual} ແມ່ນແຮງດັນຕົວຈິງໃນເສັ້ນທໍ່ (ແມັດ)
- H_{pump} ແມ່ນແຮງດັນທີ່ປ້າຜະລິດໄດ້ (ແມັດ)
- H_0 ແມ່ນແຮງດັນຂອງປ້າໃນສະພາວະຢຸດນື້ງ (Shut-off Head) ທີ່ຄວາມຖີ່ກຳນົດ (ແມັດ)
- f ແມ່ນຄວາມຖີ່ໃນການເຮັດວຽກຕົວຈິງຈາກ VFD (ເຮັດ, Hz)
- $f_{nominal}$ ແມ່ນຄວາມຖີ່ກຳນົດຂອງມໍເຕີ (50 Hz)
- Q ແມ່ນອັດຕາການໄຫຼຂອງນໍ້າ (ລິດຕໍ່ວິນາທີ)
- c ແມ່ນຄ່າສຳປະສິດຄວາມຕ້ານທານຂອງທໍ່ (Pipe Resistance Coefficient) ທີ່ໄດ້ຈາກການຄຳນວນໃນໄລຍະການຫາຈຸດເຮັດວຽກ

– ສົມຜົນການຄວບຄຸມ PID: ຕົວຄວບຄຸມຈະປະມວນຜົນສັນຍານຄວາມຜິດພາດ $e(t) = H_{setpoint} - H_{actual}$ ເພື່ອປັບຄ່າຄວາມຖີ່ $f(t)$ ຕາມສົມຜົນ (Ogata, 2010):

$$f(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

ໂດຍທີ່

- $e(t)$ ແມ່ນຄ່າຄວາມຜິດພາດລະຫວ່າງແຮງດັນເປົ້າໝາຍກັບແຮງດັນຕົວຈິງ
- K_p, K_i ແລະ K_d ແມ່ນຄ່າອັດຕາຂະຫຍາຍຂອງພາກສ່ວນ Proportional, Integral, ແລະ Derivative ຕາມລຳດັບ.

ທັງນີ້, ຄ່າພາຣາມີເຕີດັ່ງກ່າວໄດ້ມາຈາກ ການທົດລອງປັບຈຸນດ້ວຍວິທີລອງຜິດລອງຖືກ ຮ່ວມກັບການນຳໃຊ້ເຄື່ອງມື PID Tuner ໃນຊອບແວ MATLAB ເພື່ອຄົ້ນຫາຄ່າທີ່ດີທີ່ສຸດ ທີ່ເຮັດໃຫ້ລະບົບມີໄລຍະເວລາເຂົ້າສູ່ສະພາວະຄົງທີ່ຕໍ່າທີ່ສຸດ ແລະ ບໍ່ເກີດການກາຍຂອບເຂດ ທີ່ຮຸນແຮງ (Messner & Tilbury, 2019; Xue et al., 2007).

2.3 ໂຄງສ້າງລະບົບໃນ Simulink ແລະ ການແກ້ໄຂ Algebraic Loop

ໂຄງສ້າງບລັອກໄດອະແກຣມທັງໝົດຂອງລະບົບຄວບຄຸມໄດ້ຖືກສະແດງໄວ້ໃນ ຮູບພາບທີ 2. ໃນການຕໍ່ສາຍ Feedback, ໄດ້ມີການແກ້ໄຂບັນຫາ Algebraic Loop ໂດຍການແຊກບລັອກ Unit Delay (1/z) ໄວ້ໃນສາຍ Feedback ດັ່ງທີ່ Messner ແລະ Tilbury (2019) ໄດ້ແນະນຳ ເພື່ອໃຫ້ Simulink ສາມາດປະມວນຜົນໄດ້ຢ່າງລື້ນໄຫຼໂດຍການນຳໃຊ້ຄ່າຈາກ Time Step ກ່ອນໜ້າ.

2.4 ການຈຳລອງສະຖານະການລົບກວນ

ເພື່ອທົດສອບຄວາມທົນທານຂອງຕົວຄວບຄຸມ, ໄດ້ກຳນົດໃຫ້ອັດຕາການໄຫຼ (Q) ຜັນຜວນຕາມເວລາໂດຍໃຊ້ບລັອກ Repeating Sequence. ລາຍລະອຽດການຕັ້ງຄ່າ Parameters ຂອງສັນຍານລົບກວນ ທີ່ສະແດງເຖິງພຶດຕິກຳການຊົມໃຊ້ນໍ້າໃນແຕ່ລະຊ່ວງເວລາ ໄດ້ຖືກສະຫຼຸບໄວ້ໃນ ຕາຕະລາງທີ 1 (Volk, 2013).

2.5 ການເກັບກຳຂໍ້ມູນ

ເພື່ອໃຫ້ໄດ້ຂໍ້ມູນມາຊຶ່ງການວິເຄາະສະມັດຖະພາບຂອງຕົວຄວບຄຸມ, ຜູ້ຄົນຄວ້າໄດ້ກຳນົດຂັ້ນຕອນການເກັບກຳຂໍ້ມູນດັ່ງນີ້:

- ການກຳນົດໄລຍະເວລາ ແລະ ຄວາມລະອຽດ: ການຈຳລອງໄດ້ກຳນົດໄລຍະເວລາທັງໝົດໄວ້ທີ່ 10 ວິນາທີ ເຊິ່ງເປັນໄລຍະເວລາແບບຍ້ອສ່ວນ ທີ່ພຽງພໍ ແລະ ເໝາະສົມສຳລັບການວິເຄາະພຶດຕິກຳການຕອບສະໜອງທາງພະລັງສາດ ຂອງຕົວຄວບຄຸມ PID ເນື່ອງຈາກລະບົບໄຮໂດຣລິກຂອງປ້ານໍ້າໃນແບບຈຳລອງນີ້ ມີການຕອບສະໜອງທີ່ວ່ອງໄວໃນລະດັບມິນລິວິນາທີ. ໄລຍະເວລາດັ່ງກ່າວຈຶ່ງສາມາດສະແດງຜົນການປ່ຽນແປງໃນສະພາວະຊົ່ວຄາວ ແລະ ສະພາວະຄົງທີ່ ພາຍໃຕ້ສັນຍານລົບກວນໄດ້ຢ່າງຄົບຖ້ວນ. ໂດຍການຈຳລອງນີ້ໄດ້ເລືອກໃຊ້ການປະມວນຜົນແບບປ່ຽນແປງກ້າວໂດດ ທີ່ມີຄວາມລະອຽດສູງ ເພື່ອບັນທຶກການປ່ຽນແປງຂອງແຮງດັນ ແລະ ຄວາມຖີ່ໃນທຸກໆຊ່ວງເວລາທີ່ເກີດສັນຍານລົບກວນຢ່າງແມ້ນຢາ.

- ການສົ່ງອອກຂໍ້ມູນ: ໄດ້ນຳໃຊ້ບລັອກ "To Workspace" ໃນ Simulink ເພື່ອບັນທຶກຄ່າແຮງດັນຕົວຈິງ (H_{actual}), ຄ່າ Set-point (30.6 ແມັດ) ແລະ ຄ່າຄວາມຖີ່ຈາກ VFD (f) ເຂົ້າໄປໃນ MATLAB Workspace ໂດຍຈັດເກັບໃນຮູບແບບຂອງຂໍ້ມູນອະນຸກົມເວລາ ເພື່ອນຳໄປພັດທະນາ ແລະ ວິເຄາະຜົນໃນຂັ້ນຕອນຕໍ່ໄປ.

- ການຈັດກຸ່ມຂໍ້ມູນ: ຂໍ້ມູນທີ່ບັນທຶກໄດ້ຈະຖືກແຍກອອກເປັນ 2 ຊຸດຫຼັກ ເພື່ອຄວາມສະດວກໃນການວິເຄາະ ດັ່ງນີ້: ຂໍ້ມູນໃນສະພາວະຊົ່ວຄາວ: ເກັບກຳຂໍ້ມູນໃນຊ່ວງເລີ່ມຕົ້ນ (0 ຫາ 1.5 ວິນາທີ) ແລະ ໃນທຸກໆຊ່ວງເວລາທີ່ມີການປ່ຽນແປງປະລິມານຄວາມຕ້ອງການຊົມໃຊ້ນໍ້າ ເພື່ອວັດແທກໄລຍະເວລາເຂົ້າສູ່ສະພາວະຄົງທີ່ ແລະ ຄ່າການກາຍຂອບເຂດ; ຂໍ້ມູນໃນສະພາວະຄົງທີ່: ເກັບກຳຂໍ້ມູນຫຼັງຈາກລະບົບຜ່ານຝັ່ນສະພາວະຊົ່ວຄາວ ແລະ ເຂົ້າສູ່ຄວາມສະໝໍ່າສະເໝີແລ້ວ ເພື່ອບັນທຶກຄ່າຄວາມຜິດພາດໃນສະພາວະຄົງທີ່ ສໍາລັບນໍາໄປທົດທອງທາງສະຖິຕິ ແລະ ປະເມີນຄວາມສະຖຽນລະພາບຂອງລະບົບ.

2.6 ການວິເຄາະທາງສະຖິຕິ

ຂໍ້ມູນທີ່ໄດ້ຈາກການຈຳລອງຜ່ານ Simulink ຈະຖືກສົ່ງອອກ ໄປຍັງ MATLAB Workspace ເພື່ອປະມວນຜົນທາງສະຖິຕິ. ເປົ້າໝາຍແມ່ນເພື່ອຢືນຢັນວ່າ ຕົວຄວບຄຸມ PID ສາມາດຮັກສາແຮງດັນໃຫ້ຢູ່ໃນຂອບເຂດທີ່ຍອມຮັບໄດ້ຫຼືບໍ່ ໂດຍມີລາຍລະອຽດດັ່ງນີ້:

1. ຕົວຊີ້ວັດສະມັດຖະພາບ: ໄດ້ນໍາໃຊ້ຄ່າສະຖິຕິຜົນຖານເພື່ອວັດແທກຄວາມແມ້ນຢ້າ ປະກອບດ້ວຍ:

- ຄ່າຄວາມຜິດພາດສະເລ່ຍ: ເພື່ອເບິ່ງພາບລວມວ່າແຮງດັນຕົວຈິງຫ່າງຈາກ Set-point 30.6 ແມັດ ຫຼາຍປານໃດ.

- Root Mean Square Error (RMSE): ໃຊ້ເພື່ອວັດແທກຄວາມຜັນຜວນຂອງແຮງດັນໃນຊ່ວງທີ່ມີສັນຍານລົບກວນ. ຄ່າ RMSE ທີ່ຕໍ່າ ໝາຍເຖິງລະບົບມີສະເຫຼ່ຍລະພາບສູງ.

- Settling Time (t_s): ວັດແທກເວລາທີ່ລະບົບໃຊ້ໃນການປັບຕົວເຂົ້າຫາຂອບເຂດຄວາມຜິດພາດ $\pm 2\%$ ຫຼື $\pm 5\%$ ຫຼັງຈາກເກີດການປ່ຽນແປງ Demand.

2. ການທົດສອບສົມມຸດຕິຖານ: ເພື່ອຢືນຢັນຄວາມໜ້າເຊື່ອຖືຂອງຜົນການຈຳລອງ, ໄດ້ນໍາໃຊ້ການທົດສອບຄ່າ t -test ລະຫວ່າງ ຄ່າແຮງດັນທີ່ວັດແທກໄດ້ ແລະ ຄ່າ Set-point (30.6 ແມັດ). ໂດຍກຳນົດລະດັບຄວາມສໍາຄັນທາງສະຖິຕິ ຢູ່ທີ່ $\alpha = 0.05$.

- ຫາກຄ່າ $p \leq 0.05$ ໝາຍຄວາມວ່າ ຄວາມແຕກຕ່າງລະຫວ່າງແຮງດັນຕົວຈິງ ແລະ ຄ່າ Set-point ແມ່ນນ້ອຍຫຼາຍຈົນບໍ່ມີໃນສໍາຄັນທາງສະຖິຕິ (ໝາຍເຖິງ PID ເຮັດວຽກໄດ້ຢ່າງແມ້ນຢ້າ).

- ຫາກຄ່າ $p > 0.05$ ໝາຍຄວາມວ່າ ລະບົບຍັງມີຄວາມຜິດພາດສູງເກີນກວ່າເກນທີ່ກຳນົດໄວ້

3. ເຄື່ອງມືທີ່ນໍາໃຊ້: ການວິເຄາະທັງໝົດແມ່ນດຳເນີນການຜ່ານຄໍາສັ່ງທາງສະຖິຕິໃນ MATLAB (mean(), std(), ແລະ ttest()) ເຊິ່ງເປັນວິທີການທີ່ໄດ້ຮັບການຍອມຮັບໃນການວິໄຈດ້ານລະບົບຄວບຄຸມ (Dorf & Bishop, 2016).

3. ຜົນໄດ້ຮັບ

ຜົນການຈຳລອງລະບົບຄວບຄຸມແຮງດັນນໍ້າດ້ວຍຕົວຄວບຄຸມ PID ຜ່ານໂປຣແກຣມ MATLAB/Simulink ໃນໄລຍະເວລາ 10 ວິນາທີ ພາຍໃຕ້ສະພາວະການຊົມໃຊ້ນໍ້າທີ່ຜັນຜວນ (ດັ່ງສະແດງໃນຮູບພາບທີ 3) ແລະ ຜົນການທົດລອງຈາກລະບົບຕົວຈິງ ມີລາຍລະອຽດດັ່ງນີ້:

3.1 ຜົນການຈຳລອງລະບົບ

1. ສະມັດຖະພາບຂອງການຮັກສາແຮງດັນ: ຈາກການຈຳລອງພົບວ່າ ຕົວຄວບຄຸມ PID ສາມາດຮັກສາແຮງດັນນໍ້າໃຫ້ເຂົ້າຫາຄ່າຄວາມດັນເປົ້າໝາຍ 30.6 ແມັດ ໄດ້ຢ່າງມີປະສິດທິພາບ. ໃນຊ່ວງເລີ່ມຕົ້ນການເຮັດວຽກ, ລະບົບມີໄລຍະເວລາເຂົ້າສູ່ສະພາວະຄົງທີ່ ຢູ່ທີ່ປະມານ 1.5 ວິນາທີ ແລະ ມີຄ່າການກາຍຂອບເຂດ ຕໍ່າກວ່າ 5% ເຊິ່ງຢູ່ໃນເກນມາດຕະຖານອຸດສາຫະກຳ. ເມື່ອມີການປ່ຽນແປງອັດຕາການໄຫຼຂອງນໍ້າ ໃນວິນາທີທີ 2, 4, 6 ແລະ 8, ລະບົບສາມາດປັບຕົວໃຫ້ກັບຄືນສູ່ສະພາວະຄົງທີ່ໄດ້ພາຍໃນເວລາສະເລ່ຍ 1.2 ວິນາທີ ຫຼັງຈາກເກີດສັນຍານລົບກວນ.

2. ການຕອບສະໜອງຂອງຄວາມຖີ່ VFD: ໃນສ່ວນຂອງການເຮັດວຽກຂອງລະບົບຂັບເຄື່ອນຄວາມຖີ່ສະຫຼັບ (VFD), ພົບວ່າຄວາມຖີ່ມີການປ່ຽນແປງແບບຜັນແປຕາມຄວາມຕ້ອງການຊົມໃຊ້ນໍ້າຕົວຈິງ. ເມື່ອຄວາມຕ້ອງການນໍ້າເພີ່ມຂຶ້ນສູງສຸດທີ່ 60 ລິດຕໍ່ວິນາທີ ໃນວິນາທີທີ 6, VFD ໄດ້ເລັ່ງຄວາມຖີ່ຂຶ້ນສູງສຸດທີ່ 50 ເຮັດ (Hz) ເພື່ອຊີດເຊີຍແຮງດັນທີ່ຕົກລົງ. ໃນທາງກົງກັນຂ້າມ, ເມື່ອຄວາມຕ້ອງການນໍ້າຫຼຸດລົງເຫຼືອ 20 ລິດຕໍ່ວິນາທີ, ຄວາມຖີ່ຈະຖືກປັບຫຼຸດລົງມາຢູ່ທີ່ປະມານ 46.2 Hz ເພື່ອປ້ອງກັນບໍ່ໃຫ້ແຮງດັນເກີນຄ່າທີ່ກຳນົດ ແລະ ເພື່ອເພີ່ມປະສິດທິພາບການປະຢັດພະລັງງານ.

3. ຜົນການວິເຄາະທາງສະຖິຕິ: ຜ່ານການວິເຄາະຂໍ້ມູນຈາກການຈຳລອງ ໄດ້ຜົນຄ່າສະຖິຕິທີ່ຢືນຢັນຄວາມແມ້ນຢ້າຂອງລະບົບຄື: ຄ່າຄວາມຜິດພາດໃນສະພາວະຄົງທີ່ e_{ss} ມີຄ່າເຂົ້າໃກ້ສູນ ($e_{ss} \approx 0$ ແມັດ) ໃນທຸກໆຊ່ວງຂອງການທົດສອບ, ຄ່າຄວາມຄາດເຄື່ອນຮາກທີສອງຂອງກຳລັງສອງສະເລ່ຍ (Root Mean Square Error: RMSE) ຕະຫຼອດການຈຳລອງ 10 ວິນາທີ ຢູ່ທີ່ 0.42 ແມັດ. ຈາກ

ການທົດສອບຄ່າທີ (t-test) ປຽບທຽບລະຫວ່າງແຮງດັນຕົວຈິງ ແລະ ຄ່າຄວາມດັນເປົ້າໝາຍ ພົບວ່າຄ່າຄວາມໝາຍທາງສະຖິຕິ ($p < 0.001$) ຊຶ່ງນ້ອຍກວ່າລະບັບໄນສໍາຄັນ $\alpha = 0.05$ ທີ່ກໍານົດໄວ້. ຈຶ່ງສະຫຼຸບໄດ້ວ່າຕົວຄວບຄຸມ PID ຈາກການຈຳລອງສາມາດຮັກສາແຮງດັນໄດ້ຢ່າງມີຄວາມໝາຍທາງສະຖິຕິ.

3.2 ຜົນການທົດລອງຈາກລະບົບຕົວຈິງ

ເພື່ອຢືນຢັນຄວາມຖືກຕ້ອງຂອງແບບຈຳລອງ, ໄດ້ນຳເອົາຄ່າພາຣາມີເຕີ K_p, K_i ແລະ K_d ທີ່ໄດ້ຈາກການຈຳລອງໄປປ້ອນເຂົ້າໃນລະບົບ PLC ເພື່ອຄວບຄຸມປໍ້ານໍ້າໃນສະພາບແວດລ້ອມຕົວຈິງ ພົບວ່າ: ລະບົບຕົວຈິງສາມາດຮັກສາແຮງດັນນໍ້າໃຫ້ຄົງທີ່ຢູ່ທີ່ 30.6 ແມັດ ໄດ້ເຊັ່ນກັນ ໂດຍມີໄລຍະເວລາເຂົ້າສູ່ສະພາວະຄົງທີ່ (Settling Time) ຢູ່ທີ່ປະມານ 1.8 ວິນາທີ ແລະ ມີຄ່າຄວາມຜິດພາດໃນສະພາວະຄົງທີ່ຢູ່ໃນເກນຕໍ່າ ເຊິ່ງສາມາດຍອມຮັບໄດ້ໃນທາງປະຕິບັດ.

4. ວິພາກຜົນ

ຜົນໄດ້ຮັບທີ່ໄດ້ຈາກການສຶກສານີ້ສະແດງໃຫ້ເຫັນວ່າ ການປະສານງານລະຫວ່າງຕົວຄວບຄຸມ PID ແລະ ລະບົບ VFD ສາມາດຮັກສາແຮງດັນນໍ້າໃຫ້ຄົງທີ່ໄດ້ຕາມຄ່າຄວາມດັນເປົ້າໝາຍທີ່ກໍານົດໄວ້ຢ່າງມີສະຖຽນລະພາບສູງ. ເຖິງແມ່ນວ່າຈະມີການປ່ຽນແປງອັດຕາການໄຫຼຂອງນໍ້າຢ່າງກະທັນຫັນ, ແຕ່ລະບົບກໍສາມາດປັບຕົວ ແລະ ກັບຄືນສູ່ຈຸດສົມດຸນໄດ້ຢ່າງວ່ອງໄວ. ຜົນການທົດລອງດັ່ງກ່າວມີຄວາມສອດຄ່ອງກັບທິດສະດີການຄວບຄຸມຂອງ Ogata (2010) ແລະ Kuo (2014) ທີ່ລະບຸວ່າ ການໃຊ້ຕົວຄວບຄຸມທີ່ມີພາກສ່ວນອິນທິໂກຣ (Integral gain: K_i) ຈະຊ່ວຍກຳຈັດຄວາມຜິດພາດໃນສະພາວະຄົງທີ່ໃຫ້ໜຶດໄປ. ການທີ່ຄ່າຄວາມຜິດພາດໃນສະພາວະຄົງທີ່ (e_{ss}) ມີຄ່ານ້ອຍຫຼາຍເຂົ້າໃກ້ສູນ ($e_{ss} \approx 0$) ພ້ອມທັງມີຄ່າຄວາມໝາຍທາງສະຖິຕິ $p < 0.001$ ນັ້ນ ເປັນການຢືນຢັນວ່າ ຄ່າພາຣາມີເຕີ K_p, K_i ແລະ K_d ທີ່ເລືອກໃຊ້ນັ້ນມີຄວາມເໝາະສົມກັບລະບົບໄຮໂດຣລິກນີ້ຢ່າງແທ້ຈິງ.

ເມື່ອພິຈາລະນາໃນແງ່ຂອງການປະຢັດພະລັງງານ ໂດຍປຽບທຽບກັບບົດແນະນຳຂອງກະຊວງພະລັງງານສະຫະລັດອາເມລິກາ (United States Department of Energy, 2016), ການທີ່ VFD ສາມາດຫຼຸດຄວາມຖີ່ລົງມາເຫຼືອ 46.2 Hz ໃນຊ່ວງທີ່ມີຄວາມຕ້ອງການນໍ້າຕໍ່າ ຖືເປັນຈຸດພື້ນເດັ່ນທີ່ສໍາຄັນ. ເພາະອີງຕາມກົດເກນຄວາມຄ້າຍຄືກັນຂອງປໍ້າ, ກຳລັງໄຟຟ້າທີ່ຊົມໃຊ້ຈະແປຜັນກົງກັບ

ກຳລັງສາມຂອງຄວາມໄວຮອບ ($P \propto n^3$). ສະນັ້ນ, ການຫຼຸດຄວາມຖີ່ ແລະ ຄວາມໄວຮອບລົງພຽງແຕ່ 7.6% (ຈາກ 50 Hz ເຫຼືອ 46.2 Hz) ຈະສາມາດຊ່ວຍຫຼຸດຜ່ອນການຊົມໃຊ້ພະລັງງານໄຟຟ້າຂອງປໍ້າລົງໄດ້ຫຼາຍກວ່າ 20%. ນອກຈາກນີ້, ຄວາມວ່ອງໄວໃນການຕອບສະໜອງຂອງລະບົບທີ່ມີໄລຍະເວລາເຂົ້າສູ່ສະພາວະຄົງທີ່ຕໍ່າກວ່າ 1.5 ວິນາທີ ($T_s < 1.5s$) ຍັງຊ່ວຍຫຼຸດຜ່ອນການເກີດປະກົດການແຮງດັນກະແທກໃນເສັ້ນທໍ່ ເຊິ່ງເປັນສາເຫດຫຼັກທີ່ເຮັດໃຫ້ທໍ່ສົ່ງນໍ້າແຕກຫັກ ເສຍຫາຍ ດັ່ງທີ່ Bose (2006) ໄດ້ເຄີຍວິພາກໄວ້.

ຈຸດເດັ່ນທີ່ເປັນຂໍ້ສັງເກດ ແລະ ເປັນສິ່ງໃໝ່ ທີ່ຄົ້ນພົບໃນການວິໄຈນີ້ຄື ການແກ້ໄຂບັນຫາທາງເຕັກນິກໃນການຈຳລອງ ໂດຍການເລືອກໃຊ້ບລັອກໜ່ວງເວລາແຊກເຂົ້າໃນການປ້ອນກັບຂອງສັນຍານ. ການດຳເນີນການດັ່ງກ່າວຊ່ວຍໃຫ້ການປະມວນຜົນໃນໂປຣແກຣມ Simulink ບໍ່ເກີດການຢຸດຊະງັກຈາກຄວາມຜິດພາດຂອງວົງຮອບພຶດຊະຄະນິດ. ສິ່ງຜົນໃຫ້ການຈຳລອງມີຄວາມສະໝໍ່າສະເໝີ ແລະ ເຮັດໃຫ້ຜົນການວິເຄາະທາງສະຖິຕິມີຄວາມຕໍ່ເນື່ອງ, ຊັດເຈນ ແລະ ມີຄວາມໜ້າເຊື່ອຖືສູງກວ່າການຈຳລອງລະບົບຄວບຄຸມແບບດັ້ງເດີມ.

5. ສະຫຼຸບ

ການສຶກສາຄັ້ງນີ້ສາມາດແກ້ໄຂບັນຫາຄວາມຜັນຜວນຂອງແຮງດັນນໍ້າ ແລະ ການສູນເສຍພະລັງງານໄຟຟ້າໃນລະບົບປໍ້ານໍ້າ ເນື່ອງຈາກພຶດຕິກຳການຊົມໃຊ້ນໍ້າທີ່ບໍ່ສະໝໍ່າສະເໝີໄດ້ຢ່າງມີປະສິດທິພາບ ໂດຍຜ່ານການອອກແບບ ແລະ ຈຳລອງລະບົບຄວບຄຸມແຮງດັນນໍ້າແບບປິດທີ່ຜສານງານລະຫວ່າງຕົວຄວບຄຸມ PID ແລະ ລະບົບຂັບເຄື່ອນຄວາມຖີ່ສະຫຼັບ (VFD). ສິ່ງທີ່ໄດ້ຮັບຈາກການສຶກສາຄັ້ງນີ້ ສາມາດສະຫຼຸບໄດ້ດັ່ງນີ້:

- ຜົນການຈຳລອງລະບົບ: ຜ່ານໂປຣແກຣມ MATLAB/Simulink ຢືນຢັນວ່າ ຕົວຄວບຄຸມ PID ທີ່ປັບຈຸນດ້ວຍຄ່າພາຣາມີເຕີທີ່ເໝາະສົມ ມີຄວາມວ່ອງໄວສູງໃນການຕອບສະໜອງການຕອບສະໜອງໃນສະພາວະຊົ່ວຄາວ ໂດຍສາມາດຮັກສາແຮງດັນນໍ້າໃຫ້ຄົງທີ່ ແລະ ກຳຈັດຄວາມຜິດພາດໃນສະພາວະຄົງທີ່ໃຫ້ເປັນສູນໄດ້ຢ່າງມີຄວາມໝາຍທາງສະຖິຕິ ພາຍໃຕ້ສະພາວະການຊົມໃຊ້ນໍ້າທີ່ຜັນຜວນ.

- ຜົນການທົດລອງຈິງ ແລະ ການປຽບທຽບ: ເມື່ອນຳຄ່າພາຣາມີເຕີດັ່ງກ່າວໄປປະຍຸກໃຊ້ກັບລະບົບຄວບຄຸມຕົວຈິງ ພົບວ່າລະບົບສາມາດຮັກສາແຮງດັນໄດ້ຕາມຄ່າເປົ້າ

ໝາຍເຊັ່ນດຽວກັນ ເຊິ່ງຜົນໄດ້ຮັບມີຄວາມສອດຄ່ອງກັບ ຜົນການຈຳລອງເປັນຢ່າງດີ.

- ການປະຢັດພະລັງງານ ແລະ ຄວາມປອດໄພ: ການນຳໃຊ້ VFD ຍັງຊ່ວຍຫຼຸດຜ່ອນການບໍລິໂພກພະລັງງານໄຟຟ້າໄດ້ຢ່າງຫຼວງຫຼາຍໃນຊ່ວງທີ່ມີຄວາມຕ້ອງການຊົມໃຊ້ນ້ຳຕ່ຳ ໂດຍການປັບປ່ຽນຄວາມຖີ່ຕາມຄວາມຕ້ອງການຈິງ ເຊິ່ງສອດຄ່ອງກັບກົດເກນຄວາມຄ້າຍຄືກັນຂອງປ້າ ຜ່ອມ ທັງຊ່ວຍຫຼຸດຜ່ອນຜົນກະທົບຈາກປະກົດການແຮງດັນກະແທກໃນເສັ້ນທໍ່.

ສິ່ງໃໝ່ທີ່ຄົ້ນພົບ ແລະ ຈຸດເດັ່ນ: ຄືການນຳສະເໜີເຕັກນິກການແກ້ໄຂບັນຫາວົງຮອບພຶດຊະຄະນິດ ດ້ວຍການໃຊ້ບລັອກໜ່ວງເວລາ ເຂົ້າໃນການຈຳລອງລະບົບໄຮໂດຣລິກ ທີ່ຊ່ວຍໃຫ້ການປະມວນຜົນຂອງຊອບແວມີຄວາມສະຖຽນ ແລະ ສະທ້ອນເຖິງພຶດຕິກຳຂອງອຸປະກອນຈິງໄດ້ແມ້ນຢ່າງຂຶ້ນ.

ຂໍ້ຈຳກັດ ແລະ ການສຶກສາໃນອະນາຄົດ: ເຖິງຢ່າງໃດກໍຕາມ, ການສຶກສານີ້ຍັງມີຂໍ້ຈຳກັດເນື່ອງຈາກປັດໄຈລົບກວນພາຍນອກບາງຢ່າງ ເຊັ່ນ: ສັນຍານລົບກວນທາງໄຟຟ້າ (EMI) ຍັງບໍ່ໄດ້ຖືກນຳມາພິຈາລະນາ. ສະນັ້ນ, ການຄົ້ນຄວ້າໃນຂັ້ນຕໍ່ໄປ ຄວນມີການທົດລອງແບບຮາດແວໃນວົງຮອບ ເພື່ອເພີ່ມຄວາມແມ້ນຢ່າ. ນອກຈາກນີ້, ຄວນສຶກສາການນຳໃຊ້ເຕັກນິກການປັບຈຸນພາຣາມິເຕີແບບອັດຕະໂນມັດ ຫຼື ການນຳໃຊ້ລະບົບຄວບຄຸມຟັດຊີຕັກກະມາປະສົມປະສານຮ່ວມກັບ PID ເພື່ອເພີ່ມຄວາມສາມາດໃນການຮັບມືກັບລະບົບທີ່ມີຄວາມບໍ່ແນ່ນອນສູງ ແລະ ພັດທະນາໄປສູ່ລະບົບປະປາອັດສະລິຍະໃນອາຄານຕົວຈິງຢ່າງເຕັມຮູບແບບ.

6. ຂໍ້ຂັດແຍ່ງ

ຂ້າພະເຈົ້າໃນນາມຜູ້ຄົ້ນຄວ້າວິທະຍາສາດ ຂໍປະຕິຍານຕົນວ່າ ຂໍ້ມູນທັງໝົດທີ່ມີໃນບົດຄວາມວິຊາການດັ່ງກ່າວນີ້ ແມ່ນບໍ່ມີຂໍ້ຂັດແຍ່ງທາງຜົນປະໂຫຍດກັບພາກສ່ວນໃດ ແລະ ບໍ່ໄດ້ເອື້ອປະໂຫຍດໃຫ້ກັບພາກສ່ວນໃດພາກສ່ວນໜຶ່ງ, ກໍລະນີມີການລະເມີດ ໃນຮູບການໃດໜຶ່ງ ຂ້າພະເຈົ້າມີຄວາມຍິນດີ ທີ່ຈະຮັບຜິດຊອບແຕ່ພຽງຜູ້ດຽວ.

7. ເອກະສານອ້າງອີງ

Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society.

Bose, B. K. (2006). *Power electronics and motor drives: Advances and trends*. Academic Press.

Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2016). *Modern control systems* (13th ed.). Pearson.

Grelewicz, P., Dutkiewicz, M., & Nowak, M. (2021). Application of machine learning to performance assessment for a class of PID-based control systems. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2101.02939>

Grundfos. (2018). *Pump handbook*. Grundfos Holding A/S.

Kazeminasab, M., Jafari, A., & Piras, C. (2020). Design, characterization, and control of a size adaptable in-pipe robot using an LQR-PID controller. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2012.15236>

Kuo, B. C. (2014). *Automatic control systems*. Wiley.

MathWorks. (2018). *Simulink: Graphical environment for simulation and Model-Based Design (Version R2018a)*. <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>

Messner, W., & Tilbury, D. (2019). *Control tutorials for MATLAB and Simulink*. University of Michigan.

Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Prentice Hall.

Rashid, M. H. (2017). *Power electronics: Devices, circuits, and applications* (4th ed.). Pearson.

Southisombath, P., Phouivithath, P., & Thongphanh, P. (2025). PLC and HMI based control and monitoring system of the Xeno drinking water factory. *Souphanouvong University Journal Multidisciplinary Research and Development*, 11(03), 254–261. <https://doi.org/10.69692/SUJMRD1103254>

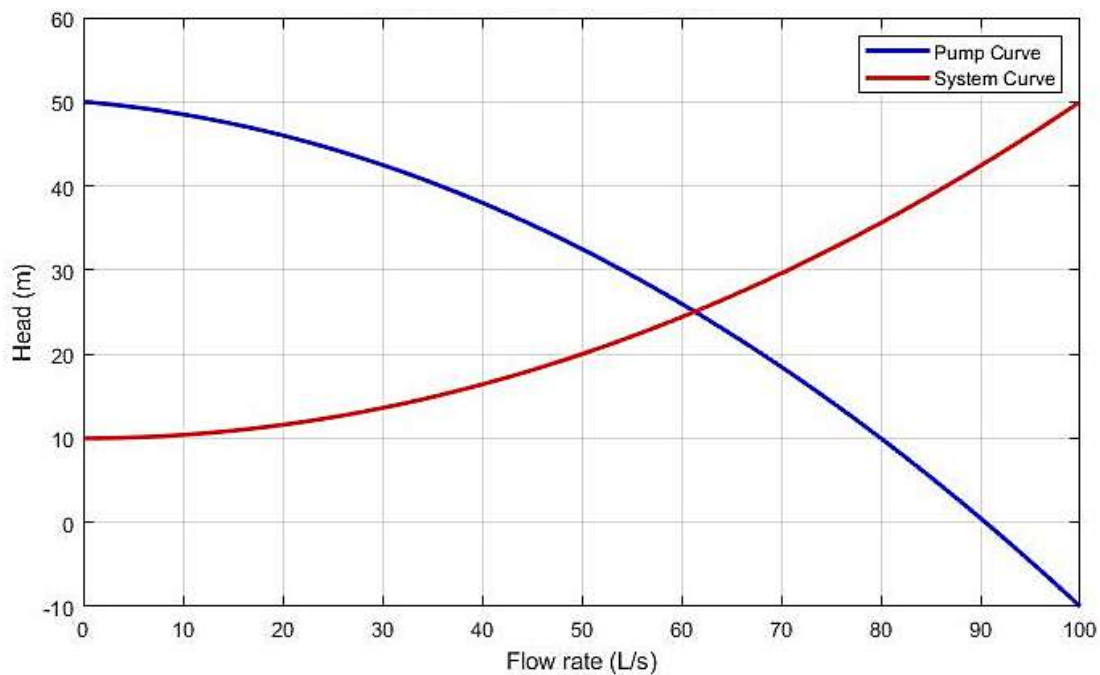
United States Department of Energy. (2016). *Variable speed pumping: A guide to successful applications*. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.

Volk, M. (2013). *Pump characteristics and applications* (3rd ed.). CRC Press.

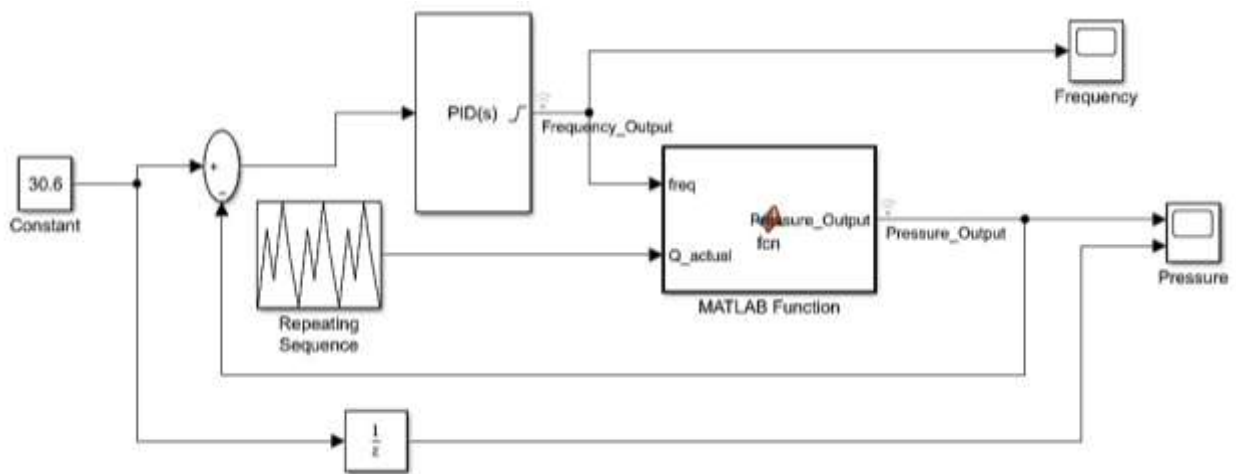
Xue, D., Chen, Y., & Atherton, D. P. (2007). *Linear control system analysis and design with MATLAB*. CRC Press.

ຕາຕະລາງທີ 1. ຂໍ້ມູນພາລາມິເຕີຂອງສັນຍານລົບກວນ

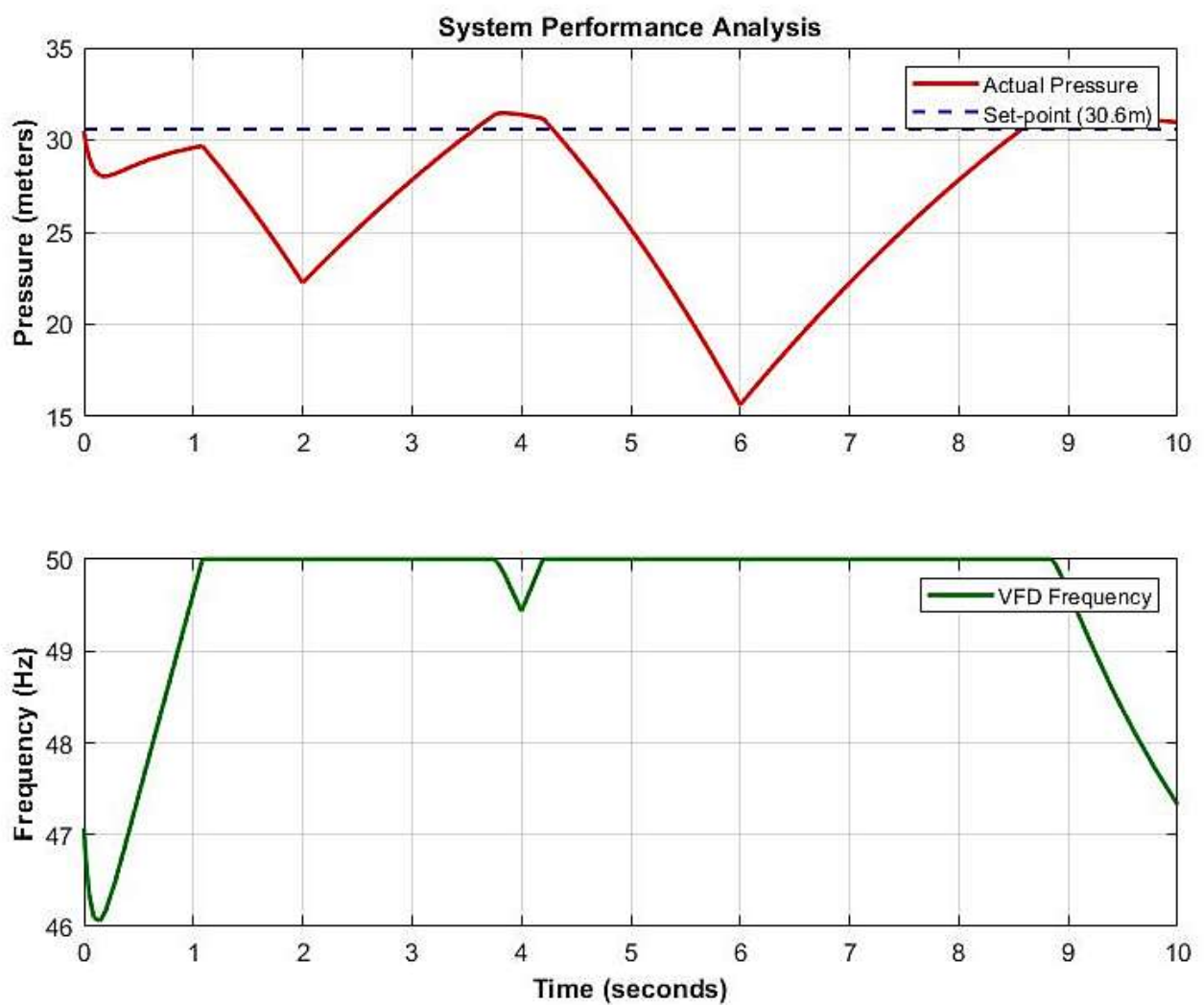
No.	Time values (s)	Output values (L/s)	ສະພາວະການຊົມໃຊ້ນໍ້າ
1	0	20	ຊ່ວງເລີ່ມຕົ້ນ
2	2	50	ການໃຊ້ນໍ້າເພີ່ມຂຶ້ນ
3	4	30	ການໃຊ້ນໍ້າຫຼຸດລົງ
4	6	60	ຊ່ວງການໃຊ້ນໍ້າສູງສຸດ
5	8	40	ການໃຊ້ນໍ້າເລີ່ມຄົງທີ່
6	10	20	ກັບຄືນສູ່ສະພາວະຕໍ່າ



ຮູບພາບທີ 1: ກາບຈຸດເຮັດວຽກຂອງລະບົບ (Pump and System Curve)



ຮູບພາບທີ 2: ບລັອກໄດອະແກຣມຂອງລະບົບຄວບຄຸມໃນ Simulink



ຮູບພາບທີ 3: ຜົນການຕອບສະໜອງຂອງແຮງດັນ ແລະ ຄວາມຖີ່ VFD